

滕吉文, 薛国强, 宋明春. 2022. 第二深度空间矿产资源探查理念与电磁法找矿实践. 地球物理学报, 65(10): 3975-3985, doi: 10.6038/cjg2022P0762.

Teng J W, Xue G Q, Song M C. 2022. Theory on exploring mineral resources in the second deep space and practices with electromagnetic method. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 65(10): 3975-3985, doi: 10.6038/cjg2022P0762.

# 第二深度空间矿产资源探查理念与电磁法找矿实践

滕吉文<sup>1,2,3</sup>, 薛国强<sup>1,2,3\*</sup>, 宋明春<sup>4</sup>

1 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

2 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029

3 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

4 河北地质大学地球科学学院, 石家庄 050031

**摘要** 我国第一深度空间(0~500 m)矿产资源量已不能满足国家战略需求, 基于我国深部矿产资源形成的空间和条件的优越性及复杂性, 提出了第二深度空间(500~2000 m)探查大型与超大型矿产资源的科学理念. 本文通过两个电磁探测实例, 论证这一理念的正确性. 首先, 分析了近源电磁探测和基于飞行平台的电磁探测新方法, 以及噪声去除、反演成像和综合解释等精细数据处理技术. 利用近年来新发展的短偏移距瞬变电磁法, 在河北围场铜多金属矿区进行了示范探测, 圈定 6 处深部矿化异常, 全部得到钻孔验证; 采用可控源音频大地电磁法, 在山东省胶东金矿区精细刻画出深部构造, 并圈定了有利赋矿部位, 揭示了焦家、马塘、寺庄等独立分布的金矿床, 其主矿体均在第二深度找矿空间相互连接, 实际属于同一金矿床, 是世界罕见的超巨型金矿床. 两个地球物理探测成果, 是第二深度空间矿产资源成矿理论和找矿实践的有效范例.

**关键词** 第二深度空间; 矿产资源; 成矿理论; 地球物理; 找矿实践

doi: 10.6038/cjg2022P0762

中图分类号 P631

收稿日期 2021-10-14, 2022-08-02 收修定稿

## Theory on exploring mineral resources in the second deep space and practices with electromagnetic method

TENG JiWen<sup>1,2,3</sup>, XUE GuoQiang<sup>1,2,3\*</sup>, SONG MingChun<sup>4</sup>

1 Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2 Innovation Academy for Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3 College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4 College of Earth Sciences, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China

**Abstract** The mineral resources buried within the first deep space (0~500 m) in China cannot meet the national strategical requirement. As there is great potential of deep-seated mineral resources in China, the new scientific concept to explore large or ultra-large mineral resources in the second deep space (500~2000 m). This paper validates this scientific concept through two field examples implemented with electromagnetic method. First, high-resolution geophysical techniques, such as the near-source electromagnetic method, flight platform-based detection, noise removal, inversion or imaging method, and comprehensive interpretation, are analyzed. The authors conducted the

**基金项目** 国家自然科学基金重点项目(42030106), 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0804), 中国科学院科研仪器设备研制项目(YJKYYQ20190004) 资助.

**第一作者简介** 滕吉文, 男, 1934 年生, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向: 深部动力学. E-mail: tengjiwen@mail.iggcas.ac.cn

**\* 通讯作者** 薛国强, 男, 1966 年生, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向: 瞬变电磁探测理论方法研究. E-mail: ppxueguoqiang@163.com

copper polymetallic mine exploration by using the newly developed SOTEM method in Weichang deposit, Hebei province. 6 deep-seated mineralization abnormalities were revealed and were verified by subsequent drillings. Furthermore, based on a CSAMT survey, the deep structure and potential mining site are delineated in Jiaodong Peninsula. It is found that the independently distributed gold deposits such as Jiaojia, Matang, and Sizhuang, are connected in the second deep space, belong to the same gold deposit and thus become a rare supergiant gold deposit. Both two examples strongly support theory on mineralization and exploring mineral resources in the second deep space.

**Keywords** The second deep space; Mineral resources; The theory of metallogenic; Geophysics; Exploration practice

# 0 引言

第一找矿、勘探与开发深度空间,是指由地表到深度为 500 m 处;第二深度空间,是指 500~2000 m 的深度范围;第三深度空间,系指 2000 m 以下的找矿、勘探与开发空间(滕吉文,2003,2006;滕吉文等,2009). 当前我国矿产资源勘查主要在浅部,公布的各类矿产资源量,大部分为浅部第一深度空间探查的矿产资源量.从理论上讲,深部空间是地壳物质、能量交换和相互作用的集中区域,适合成矿元素的聚集和矿床的产生(滕吉文等,2007). 在全球范围内,对于第二深度空间的矿产资源的探测和开发近年取得了明显的效果(滕吉文等,2016). 我国第二深度空间的找矿潜力巨大,但需要借助高科技地球物理勘探来获取深部信息,以有效识别大型和超大型矿床(滕吉文,2021).

地球物理方法基于物理场在地球介质中的响应特征,获取地下目标体的物性参数属性.在矿产资源探测中,当含矿岩体的物理参数属性与背景围岩存在差别时,即可能借助地球物理场实现对矿体的识别和定位,比如地震方法可以给出地下介质的弹性波速度属性,电磁法可获得电阻率和极化率属性(Di et al., 2020a, b; Guo et al., 2020),重力和磁法可以分别得到密度和磁化率属性.这些地球物理方法是寻找和圈定深部隐伏矿床的重要工具.随着探测目标体埋深的增大,地球物理方法和技术的革新成为推动第二深度空间矿产资源探测的重要力量.高分辨电磁探测技术、高精度重力及磁法、高精度地壳宽角反射/折射技术、高分辨率地震反射技术和小孔径精细三维地震层析成像技术等新技术的出现,为深部隐伏矿床和矿集区的探查提供了可靠的地球物理手段.

电磁法是矿产资源探测的核心方法之一(Kaufman and Keller, 1981). 根据场源和装置形式的不同,电磁法可分为:大地电磁法(Magnetotelluric, MT)(Cagniard, 1953)、音频大地电磁法(Audio Magnetotelluric, AMT)、可控源音频大地电磁法(Controlled Source Audio Magnetotelluric, CSAMT)(Goldstein and Strangway, 1975)、广域电磁法(Wide Field Electromagnetic, WFEM)(何继善, 2010a, b)、长偏移瞬变电磁法(Long Offset Transient Electromagnetic, LOTEM)(Strack, 1992; 严良俊等, 2001)、时频电磁法(Time Frequency Electromagnetic, TFEM)(何展翔等, 2020)和短偏移电磁法(Short Offset Transient Electromagnetic, SOTEM)(薛国强等, 2013; 何继善和薛国强, 2018)等. 上述方法中,除 AMT 和 MT 方法外均属人工源方法,其中 CSAMT 和 WFEM 为频率域方法,LOTEM 和 SOTEM 为时间域方法,TFEM 是在 CSAMT 和 LOTEM 基础上发展起来的频率域与时间域混合的双模方法.电磁法能够实现地下由浅及深的电阻率成像,对深部矿产资源圈定起到至关重要的作用.如何兼顾探测深度和精度,保障第二深度空间的探测效果,是当前电磁新方法和新技术研究的重要方向.

中国陆地由多个块体镶嵌而成,成矿条件良好,资源潜力巨大.世界三大成矿域在我国均有分布,且最新的成矿理论研究和深部预测结果均表明:我国陆地叠加有多期次、大规模成矿作用,在 2000 m 深部蕴藏着巨量矿产资源.在第二深度空间矿产资源探查理念指导下,有效发挥地球物理探测技术,对推动深部矿产资源勘探具有重要的作用.本文以电磁法为例,介绍了近年新发展的、适于第二深度空间矿产资源探测的电磁法新技术,并结合典型矿区的电磁探测结果,给出了第二深度空间矿产资源探测的有效范例.

# 1 第二深度空间矿产资源探查科学理念

从地球动力学的角度来看,大型、超大型矿床的时空分布在本质上受到深部物质运移和深层过程的制约,而壳、幔物质的结构和构造则是控制地壳内部大规模流体的分异、调整、运移、聚集与形成的最主要的深部因素.深入探讨岩石圈及与相邻圈层间物质和能量交换及其深层动力过程,有益于认识成矿元素的离散与聚集的机制及时空格局,以及预测金属矿床出现的类型和聚集的空间部位,从而为大型、超大型矿床及矿集区的探查和预测提供导向(滕吉文等,2007).

矿产资源的形成与聚集,涉及地球深部物质与能量的交换和深层动力过程(图 1).因此,在第二深度空间金属矿产资源探查前,必须从机理上给出新的认识和建立新的运动学和动力学的模型.地面浅表处的金属矿产资源,包括大型、超大型矿床和多金属矿集区的形成,均是由地球内部物质与能量的交换所致(图 1),涉及到地球深处壳、幔介质与构造格局、物质状态、运移行为、物质属性和其空间展布的深层动力过程.这表明:当今第一深度空间的已有矿

产资源,并非是地下矿产资源的整体或全部,在第二深度空间必然存在着矿体的继续伸展和聚集(严加永等,2008).

# 2 矿产资源电磁探测高分辨方法技术

随着地球物理方法和技术的革新,近年来多种地球物理方法已在第二深度空间探测中发挥重要作用,比如高精度重力和磁法、电磁法、高精度反射/折射地震法等.新一代的高精度磁力仪,如超导磁力仪、光泵磁力仪和旋进式磁力仪,也在近年来得到发展.分型、遗传算法、贝叶斯方法和神经网络算法等新方法应用于数据处理也取得了重要进展(Zhang et al.,2004; Chen G X et al.,2015; Chen W Y et al.,2015).结合地震高精度探测技术的发展和成矿规律的认识,开展矿产资源勘查和成矿动力学研究是目前重要的研究方向.地震宽角发射/折射技术,能够获得深部的速度结构、泊松比和深部各向异性信息等,从而描绘出深部成矿带的空间构造和环境,对定位矿体或含矿构造具有重要作用.

相比于浅部矿产资源探测,深部探测难以采用浅表获取的数据对结果进行约束,因此具有更大的多解性和不确定性.在解释地球物理反演结果时,浅表的地质与地球物理信息往往作为先验模型,以获取合理的球物理解释.而在深部探测时,这种做法往往会导致数据严重偏离真实模型.地球内部结构复杂,物理-化学环境状态异变,深部矿产资源勘探和开发的难度更大,此时,地球物理方法的探测精度成为关键.获取由浅及深高精度探测结果,成为探测结果可靠性的有效保障,也是矿产资源探测获得成功的关键(滕吉文,2021).近年来,在人工源电磁法基本理论的指导下,国内先后研发出兼具大深度和高精度的电磁探测方法,比如广域电磁法和电性源瞬变电磁法.在这些方法上所涌现的数据处理和反演的新技术,进一步提升了方法的应用效果.

广域电磁法由何继善院士(2010)提出,它是一种人工源频率域电磁探测新技术.广域电磁法的观测方式类似于可控源音频大地电磁法,但观测区域较后者更大.通过采用更精确的电磁场响应定义“广义视电阻率”,广域电磁法能够获得比 CSAMT 更为宽广的观测区域、更高的探测效率和更大的勘探深度.目前,广域电磁法已在国内多个矿区开展了应用示范研究,包括隐伏金矿(邓锋华等,2013)、多金属矿区(梁维天等,2020)等.高精度三维反演将是该

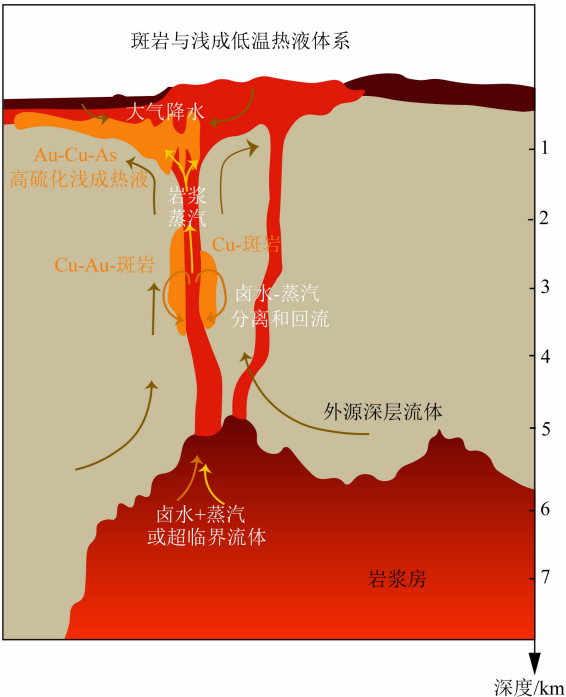


图 1 第二深度空间流体成矿模型  
Fig. 1 The fluid mineralization model  
in the second deep space

方法的研究和应用重点。

瞬变电磁法是利用不接地回线或接地导线向地下发送一次脉冲磁场,在一次脉冲磁场的间隙期间,观测二次涡流场,以进行地下矿产资源勘探的一种电磁勘探方法(李貅等,2007;薛国强等,2007)。电性源瞬变电磁法采用接地导线作为发射源,因其发射功率较大,能够开展大深度探测以满足第二空间矿产资源的勘探需求。根据观测区域与接地导线源之间的相互关系,可分为长偏移距瞬变电磁法,短偏移距瞬变电磁法和多道瞬变电磁法(MTEM)。LOTEM 和 MTEM 主要应用于地壳构造探测、油气资源勘探和地热探查(Ziolkowski et al., 2007)。SOTEM 方法由国内学者薛国强等(2013)提出,在近源区域观测电磁场信号,偏移距通常为  $0.3 \sim 2$  倍探测深度。目前 SOTEM 已在包括煤矿、铁矿和银铅锌矿等矿产资源探测中获得成功应用(Xue et al., 2014, 2018; Chen W Y et al., 2015, 2017; Zhou et al., 2016; Chen et al., 2017; Xue et al., 2018; Di et al., 2019; Hou et al., 2019; Li et al., 2019)。

电磁法高分辨探测技术研究主要包括:

(1) 基于飞行平台的探测技术。航空电磁法和半航空电磁法是近年得到快速发展的电磁法技术。通过将全部或者部分数据采集设备置于飞行平台上,这两类方法能够在复杂地形和地貌条件下开展探测,尤其在沙漠、沼泽和高原等难以以人力开展数据采集的复杂环境下具有明显优势。此外,该方法具备探测效率高、采样密集和覆盖范围广等特点,在矿产资源的普查和详查方面均能发挥重要作用。经过几十年的发展和测试,目前时间域航空电磁法已是国内外的研发重点,发展了 VTEM, SkyTEM, HeliTEM 等商用探测系统,并已在矿产资源探测中发挥重要作用(Smith et al., 2010)。近年来,国内也发展了包括 CHTEM-I 和 CHTEM-II 的航空瞬变电磁探测系统(Lin et al., 2021),中国地质调查局航遥中心和中国科学院地质与地球物理所也在相关科研项目的资助下,开展航空瞬变电磁探测系统的研发与测试工作。半航空电磁法仅需将接收装备搭载在飞行平台上,故可采用小型无人机开展相关研发和测试工作,目前国内包括成都理工大学、骄鹏公司和吉林大学等,都发展了半航空电磁探测系统,并开展了实际测试与探测(Wu et al., 2019)。

(2) 噪声去除技术。当今电磁法勘探大多要处于干扰环境中实施,即须在强干扰的背景下提取微弱有效信号,电磁法噪声去除技术成为探测取得成

功的前提条件之一。近年来,基于原始数据的噪声去除技术得以发展,这其中既包括了在硬件系统设计时在噪声压制方面的考虑和设计,也包括对采集的原始时间序列的各种噪声压制技术。在硬件噪声压制方面,低噪声磁场传感器、等值反磁通传感器和磁通门的研发和设计能在一定程度上提高信噪比,同时也包括空心线圈传感器的优化设计等(刘长胜等, 2019; 裴易峰等, 2019; 刘腾, 2019; 王银等, 2017)。在基于算法的噪声压制技术方面,近年来发展了基于数字递归陷波的噪声周期噪声压制(张文伟等, 2020)、基于 Hilbert-Huang 的时频域噪声去除(朱通, 2018; Li et al., 2016)和基于正交多项式法的航空电磁运动噪声去除(黄威等, 2019)等新技术,基于深度学习和神经网络的相关技术开始被应用于瞬变电磁数据的噪声压制(Wu et al., 2020)。尽管新的噪声压制技术不断涌现,但是目前还没有一种对于各类噪声均适用的去除技术。在矿产资源探测的实际应用中,噪声源的定位和分析对于规避可能的噪声干扰至关重要。同时,记录并分析测区的纯噪声信息也能够为后续的数据处理提供必要的基础。

(3) 反演成像技术。随着仪器装备的发展,近年来在航空和地空电磁方法的数值模拟、数据预处理方法和正反演方法的研究方面也取得了一系列研究成果。其中,作为从数据到电阻率映射的核心环节,反演和成像研究是近年来的研究热点,这其中包括视电阻率成像、横向约束反演、贝叶斯反演和 2D/3D 反演等技术(Xue et al., 2020)。针对航空和半航空电磁探测系统的特殊性,对地面电磁法中得到有效应用的相关技术进行改造和拓展,发展了小波去噪技术、视电阻率成像和合成孔径成像等数据处理和成像方法(李肃义等, 2013; 李貅等, 2015)。在反演方面,基于一维正演算子,横向约束反演在航空电磁法中已成为数据反演的主流方法(Christensen et al., 2009; Vallée and Smith, 2009)。基于随机采样的贝叶斯方法近年来也得到有效应用,在恢复模型电阻率的基础上,更进一步的提供模型参数的不确定性,能够为数据的解释提供更坚实的支撑(Hawkins et al., 2018; Killingbeck et al., 2020)。在数据的高维反演方面,基于 Footprint 的基本概念所发展的高维反演方法,已完成模型测试和部分实测数据的反演(Yin et al., 2014, 2015)。电磁数据的高维反演一般采用高斯-牛顿法(GN)、拟牛顿法(QN)、L-BFGS 或非线性共轭梯度法(NLCG)。其

中 L-BFGS 和 NLCG 每次迭代仅需开展一次正演模拟和一次伴随正演,无需计算海森矩阵,在电磁数据的高维反演中应用较多(殷长春等,2015)。但是, L-BFGS 和 NLCG 方法的收敛速度较慢,当具有高效的数值模拟算子时,GN 和 QN 方法是更好的选择。

(4) 综合解释技术. 反演能够从采集的电磁数据中获取电阻率信息,但是为了进一步推测地下地质结构或地质目标体,仍然需要结合地质信息和其他地球物理结果. 数据融合和模式识别技术的发展,使得电磁数据的自动化或者解释成为一种新的趋势. 这种解释方法的速度更快,且更具客观性,能够对探测目标体进行快速、定量化预测. Campányá 等(2019)采用统计分析方法将电测井分类结果映射到电阻率成像剖面进行融合. Gulbrandsen 等(2017)融合电磁法和测井数据,并将其直接用于地质建模. 数据融合算法和不断增加的多源数据,使得相关研究逐步成为可能(Marker et al., 2017; Koch et al., 2014; He et al., 2014)。此外,基于不同数据的误差范围,给出数据解释的可靠性评价,也对数据的综合解释具有重要意义(Minsley et al., 2021)。随着重点测区多源地球物理场、地质构造和物理参数测井数据的不断增加,使得综合解释成为一个重要的研究方向。

3 深部矿产资源地球物理探测实例

3.1 河北围场银窝沟铜多金属矿 SOTEM 探测

河北围场地处华北地台北缘的内蒙地轴中段,区内太古宙-古元古代发生了角闪岩相和麻粒岩相区域变质作用,形成了良好的金多金属矿源层. 中生代处于燕山陆内造山带北部,经历了印支运动、燕山运动和多期强烈的构造岩浆活动,具有非常有利的金、银、多金属成矿的地质条件. 测区属燕山山系,海拔标高一般为 1000~1300 m,地形起伏严重,以往探测深度 300 m。

测区出露主要地层为侏罗系张家口组火山岩地层,局部为白垩系花吉营组. 张家口组分布在区内大部分地域,由于风化强烈,产状不甚清楚,大致沿火山口呈环状向外倾斜的低角度产出. 地表局部覆盖浅层残坡积物和洪冲积物. 测区位于乌龙沟-上黄旗“Y”型断裂东支西侧,受区域构造影响,区内主要发育两组断裂构造,主要是北东向,其次是北西向. 两组断裂构造共同控制着区内六楞沟火山机构,环状

及放射状次级断裂也较为发育,为矿液的运移、沉淀提供了有利的构造空间。

以往资料表明,不含金属矿物类岩石的电阻率均值多在 2500 Ωm 以上,而含金属矿物类岩石的电阻率视矿物的含量而定,一般小于不含矿岩石,如含铜品位 3%左右的浸染状铜矿石电阻率约为 200 Ωm. 因此,矿区内矿化异常体表现为低电阻率特性。

为调查区内控矿、赋矿构造,圈定找矿靶区,在矿区范围内共布设 10 条 SOTEM 测线,每条测线长度为 800 m,测线间距为 50 m,测点间距 20 m,共有 410 个测点. 发射源沿测区西南向村庄附近的一条道路布设,发射源方位大致为东偏南 46°,长度为 750 m. 测线 L1 距离发射源最近,线中心距发射源中心距离为 645 m,测线 L10 距离发射源最远,中心点距离为 1090 m(图 2)。

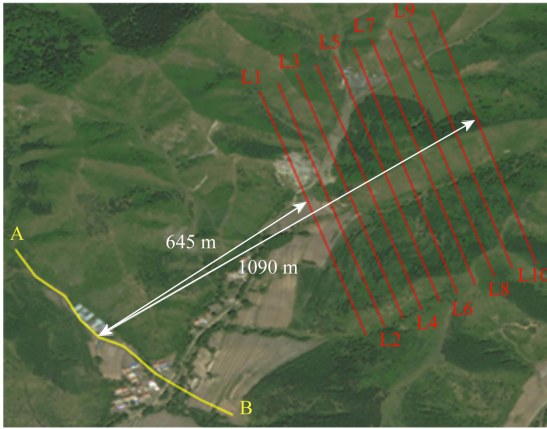


图 2 测线布置示意图

Fig. 2 Schematic of the layout of the survey line

对 10 条测线的数据进行数据滤波与反演成像,得到每条线的电阻率-高程断面图. 反演中,模型最大深度为 1500 m. 图 3 给出了 L4 和 L7 线的反演结果. 处理结果显示测区内电阻率由浅及深逐渐增高,由浅部的几十欧姆增大到深部的几千欧姆. 横向上,一定深度范围内的电阻率出现几处高低阻的突变. 结合地质工作查明的断裂情况,推断电阻率-高程断面图中出现的横向电阻率突变位置对应于断裂带穿过的地方. 因此,在图中可以定性地圈定出几条断裂,如图 3 中红线所示。

将所有测线处理结果汇总成三维立体图,如图 4 所示. 根据成矿理论及矿床富集规律,特别是针对该区的岩浆成矿机制,断裂带附近尤其是多个断裂交汇处是成矿元素容易随岩浆运移、汇集的区域,是找矿的主要目标区. 图 5 所示的电阻率平面图中,均可以圈定几处明显的断裂交汇导致的低阻区域,结



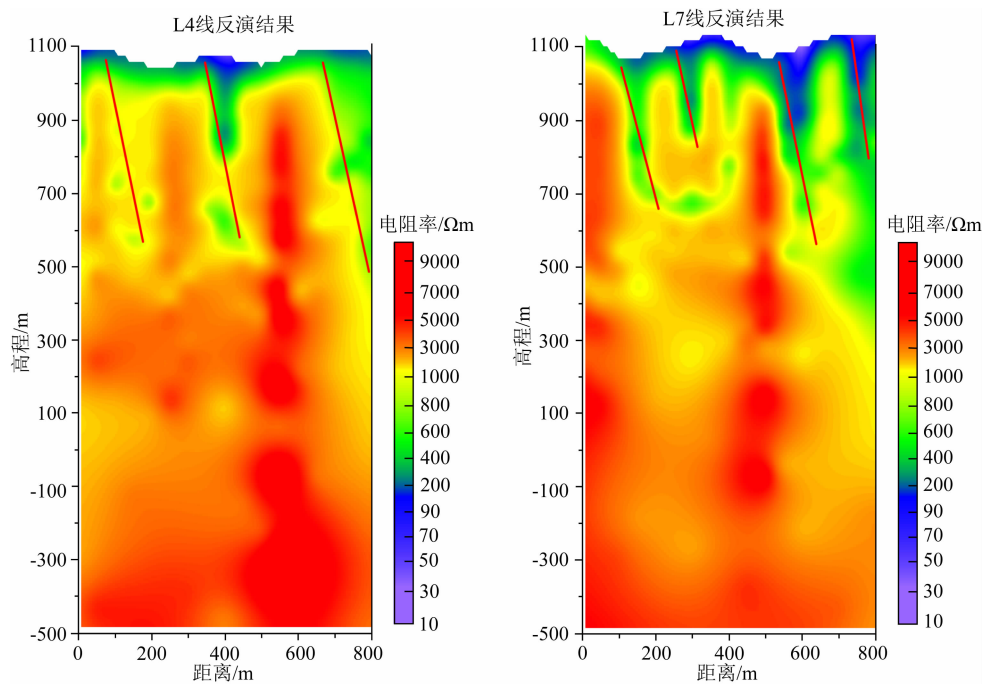


图 3 L4、L7 线反演电阻率-高程断面图

Fig. 3 The section of recovered resistivity-elevation for L4 and L7

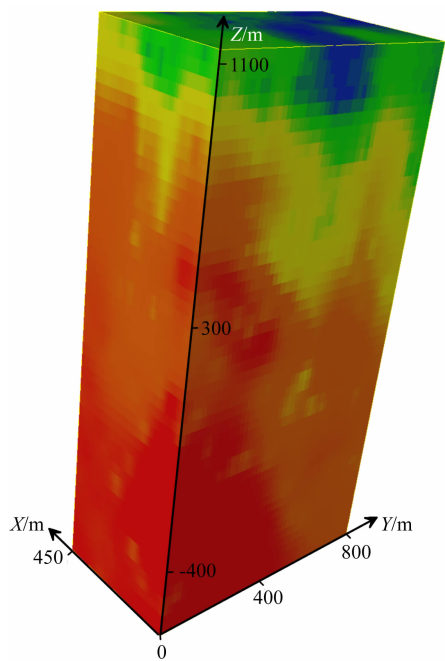


图 4 三维立体图与平面等值线图

Fig. 4 3D demonstration of the recovered resistivity

合地表踏勘及已有地质资料,认为该区域可能是矿体的富集区。

根据 SOTEM 电阻率-高程断面图及不同深度的电阻率平面图,我们推断出 6 处为可能的赋矿位置,如图 5 所示,建议实施钻探验证,建议钻探深度 600 m,并有可能对钻孔 1 和钻孔 6 钻进至 1000 m。钻孔结果证实深部发现了铅、锌、铜、铁等矿化岩石(表 1)。

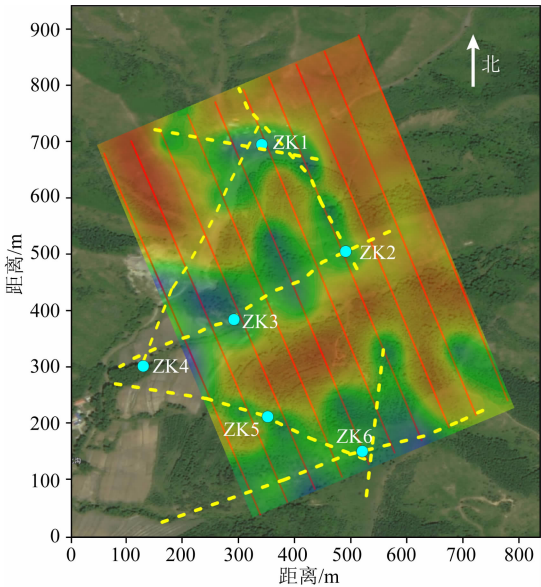


图 5 电阻率平面分布图与建议钻孔位置

Fig. 5 Plane view of resistivity distribution and the position of the suggested drill holes

表 1 钻孔揭露含矿岩石信息

Table 1 Drill holes to reveal information about ore-bearing rocks

钻孔编号 (钻孔深度)	ZK1(854 m)	ZK5(560 m)	ZK2(766 m)
矿种,	① 铜, 10 m,	① 铜, 2 m,	① 铜, 10 m,
矿(化)体	—510 m	—120 m	—520 m
厚度,	② 铅锌, 2 m,	② 铜铅锌,	② 铁, 5 m,
产出深度	—690 m	5 m, —503 m	—700 m
	③ 铅锌, 1 m,		
	—730 m		

### 3.2 胶东焦家金矿田 CSAMT 深部探测

胶东位于华北克拉通东南边缘,是中国最重要的金成矿区,已探明金资源量超过 5000 t,占全国的近 1/3,其中,近年探明的 500~2000 m 第二深度空间金资源量已达第一深度空间的 2 倍(宋明春等,2019)。地球物理方法在第二深度空间找矿中发挥了重要作用(Song et al.,2012a;宋明春,2015;宋明春等,2020)。

焦家金矿田处于胶东的西北部,其西侧邻近渤海湾。该区主要由早前寒武纪变质岩系和侏罗—白垩纪花岗岩类组成,地表被第四系松散沉积物浅覆盖。焦家断裂是焦家金矿田的控矿断裂,该断裂长约 60 km,宽 50~500 m。断裂总体走向 NNE,但变化较大,在  $10^{\circ}\sim 75^{\circ}$  之间呈 S 型变化;断裂倾角  $10^{\circ}\sim 78^{\circ}$ ,呈浅部缓、深部陡,陡、缓交替的铲式阶梯状特征。断裂下盘发育较多与走向平行或呈“入”字型相交的次级断裂。断裂总体发育于早前寒武纪变质岩系与侏罗—白垩纪花岗岩类接触部位。该断裂控制了焦家、新城、河东、河西等 20 余处金矿床,已探明的第一深度空间金资源量约 500 t,第二深度空间金资源量超过 1000 t。

研究表明,焦家断裂为浅部倾角陡向深部变缓的铲式断裂,而且由浅至深显示陡、缓交替变化的台阶式或坡坪式特点,矿体厚大部位赋存于台阶的陡缓转折和平缓部分,在 2000 m 垂向深度以浅出现浅部和深部两个大规模的赋矿台阶(或称矿化富集带,其中各有多个小规模赋矿台阶),二者之间为无矿间隔或弱矿化带。由此建立了胶东深部金矿阶梯成矿模式,金矿控矿断裂沿倾向出现若干个倾角由陡变缓的变化台阶,破碎带蚀变岩型矿体主要沿台阶的陡、缓转折和平缓部位富集,构成阶梯式分布型式(图 6)(Song et al.,2012b;宋明春等,2010,2020)。根据阶梯成矿模式和与成矿有关地质体的物性特征,首先采用频率域电磁探测深部构造和有利赋矿部位,识别控矿断裂向深部倾角变缓的台阶,即在地表通过高精度地球物理探测,查明控矿断裂或成矿地质体向深部的结构变化,根据阶梯模式推断深部矿的位置、规模,这一找矿方法被称为深部金矿阶梯找矿方法(宋明春等,2020)。

在焦家金矿田的寺庄矿区 360 勘探线施工的 CSAMT 剖面,揭示了焦家断裂的深部特征和深部矿体位置。剖面长度 3.2 km,探测深度 2.0 km。探测结果表明,视电阻率曲线可分为中上部的低阻带、底部的高阻带和之间的过渡梯级带(图 7)。根据该

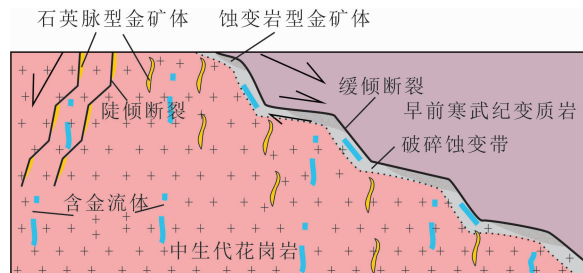


图 6 胶东深部金矿阶梯成矿模式(Song et al.,2012b,2021)

Fig. 6 The Ladder mineralization mode for the deep-seated gold deposit at Jiaodong area

区主要地质体的物性特征推断,剖面中上部的低电阻率电性层与新太古代变质岩系相对应,底部的高电阻率电性层与侏罗纪玲珑花岗岩相对应。浅部矿体已得到钻孔控制。过渡梯级带等值线自上而下呈舒缓波状定向延深,与焦家断裂带相对应。在 2200 号测点以东的已知钻孔控制区域,2300—2750 号点之间见有多层金矿体,该段的视电阻率等值线显示间距宽大、同步向下弯曲的特征,为断裂倾角较缓段,符合阶梯成矿特征。在 2200—0 号测点之间的未知地段,视电阻率等值线显示有 4 段向下弯曲变化相对较大、等值线间距相对较大的区段,分别位于 1900—2200 号点间、1200—1500 号点间、700—1000 号点间和 0—300 号点间,推断为断裂倾角变化的台阶位置,即为深部成矿的有利部位。

根据阶梯成矿模式的电磁探测结果,经过系统的深部钻探,在 940~2030 m 深度范围内探获金金属量 389 t(宋国政等,2017),探获矿体的分布范围和位置与本文上述的描述大致一致,验证了阶梯找矿方法在胶东深部找矿中的有效性。通过深部金矿勘探还发现,以往认为独立分布的焦家、马塘、寺庄、寺庄深部、马塘深部、焦家深部、纱岭-前陈等金矿床,其主矿体在第二深度找矿空间相互连接,实际属于同一金矿床,这一矿床已累计探明金资源量超过 1200 t,为一世界罕见的超巨型金矿床(宋明春等,2019)。

## 4 结论

我国处于快速工业化和经济高速发展时期,亟需巨量矿产资源作为支撑,矿产资源的紧缺已成为现实,对外依存度不断增高,实施第二深度空间金属矿产资源的找矿、勘探和开发已迫不及待。在深部金属矿产资源的探查和开发中,必须依靠新的认识和新的理念,采用先进的、高精度的地球物理探测方法

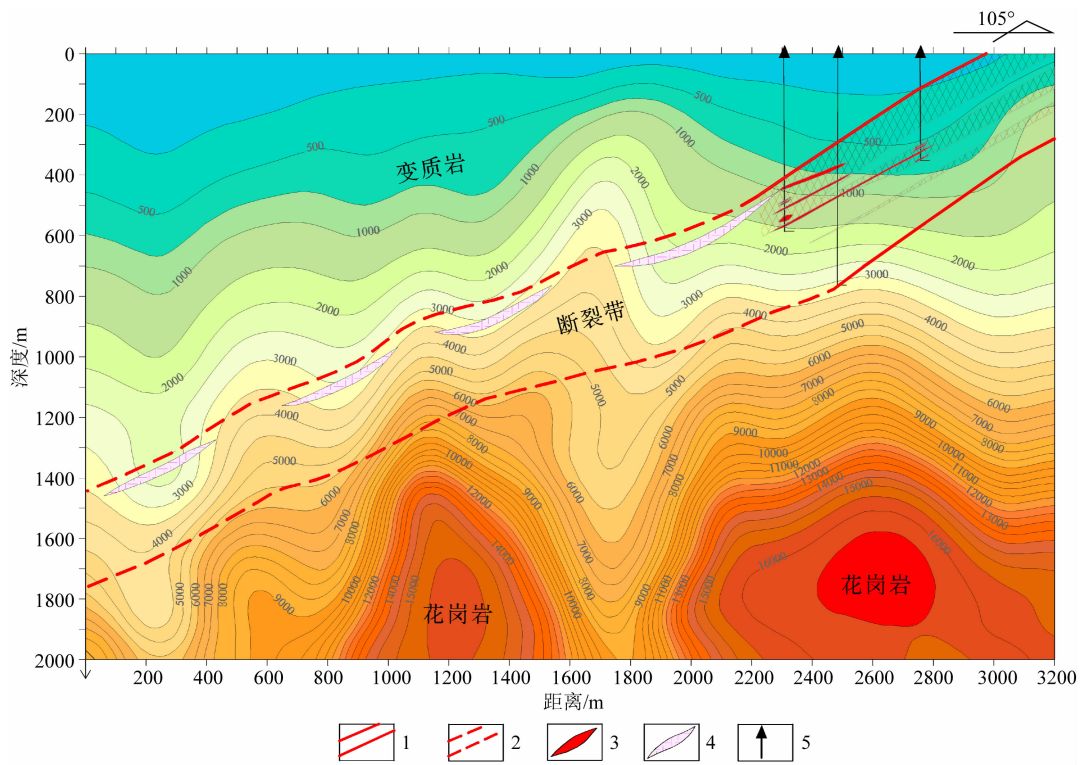


图 7 寺庄矿区 360 线 CSAMT 法剖面 and 推断的深部地质成矿特征

1-已控制断裂蚀变带; 2-推断断裂蚀变带; 3-已控制金矿体; 4-推断深部矿体; 5-已施工钻孔位置.

Fig. 7 The resistivity section of CSAMT survey and the deduced features of deep geological mineralization

1-Controlled fracture alteration zone; 2-Deduced fracture alteration zone; 3-Controlled gold orebody; 4-Deduced deep orebody; 5-Drill holes.

和技术,并建立起有自主特色的深部矿产资源探查理论、方法和技术体系. 本文所举的两个实例证实了在第二深度空间探查与发现大型和超大型矿床有着极大的远景,有力地支撑了第二深度空间矿产资源成矿理论的发展. 今后的地球物理找矿研究还应该关注以下几个方向:

(1) 加大第三深度空间地球物理精细探查工作. 开展第二深度空间探测时,厘清深部矿产资源的形成、演化和分布规律,开展成矿作用和地壳深部结构以及深层动力学研究,是确保探测结果可靠性和延续性的重要手段. 为此,开展第二深度空间矿产资源探测,不应将目光仅局限在 500~2000 m 的第二深度赋矿空间,而应探索更深部的地球物理参数分布,解译深部的成矿和构造环境,揭示矿产资源的垂向分布和演化. 因此,地球物理方法和技术的创新,应不断向更大深度的探测空间延伸,着力发展具有更大探测深度潜力的地球物理方法.

(2) 研发立体化探测新技术体系. 地球物理数据采集通常仅能在地表有限区域开展. 随着近年钻探能力的提升和航空飞行器装备的飞速发展,在地下深处和空中也能观测到地球物理数据. 这些数

据与地面观测的数据能够形成交叉互补,会极大的减弱观测数据反演结果的多解性. 尽可能利用潜在的观测空间,开展井中-地面-空中立体探测,成为获取深部可靠信息的重要方向. 当前立体化探测仍然出于分散研发和粗放应用阶段,如何发展一体化探测方法和数据处理技术,是开展大规模、集成化深部探测的重要途径.

(3) 综合利用多源地学信息. 矿产资源的形成与地球内部物质和能量交换,及其深部过程和动力学机制密切相关. 加强第二深度空间的找矿工作,离不开地球物理学与相关学科的交叉和互促. 尤其将地球科学作为整体开展研究时,如何有效整合多学科数据和信息,开展基础和理论性研究,从多方位、多角度解析多源信息,地球科学从定性分析向定量刻画挺进. 凝练交叉学科的核心科学问题,推动地球科学学科交叉融合,将成为新时代找矿勘查的重要方向.

**致谢** 感谢中国科学院地质与地球物理研究所李海和陈卫营副研究员在本文成文过程中提供的帮助.

References

Cagniard L. 1953. Basic theory of the magneto-telluric method of



- geophysical prospecting. *Geophysics*, 18(3): 605-635.
- Campanyà J, Ogaya X, Jones A G, et al. 2019. Subsurface characterization of the pennsylvanian clare basin, western Ireland, by means of joint interpretation of electromagnetic geophysical data and well-log data. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 124(7): 6200-6222.
- Chen G X, Cheng Q M, Zuo R G, et al. 2015. Identifying gravity anomalies caused by granitic intrusions in Nanling mineral district, China: a multifractal perspective. *Geophysical Prospecting*, 63(1): 256-270.
- Chen W Y, Xue G Q, Muhammad Y K, et al. 2015. Application of short-offset TEM (SOTEM) technique in mapping water-enriched zones of coal stratum, an example from East China. *Pure and Applied Geophysics*, 172(6): 1643-1651.
- Chen W Y, Xue G Q, Olatayo A L, et al. 2017. A comparison of loop time-domain electromagnetic and short-offset transient electromagnetic methods for mapping water-enriched zones—A case history in Shaanxi, China. *Geophysics*, 82(6): B201-B208.
- Christensen N B, Reid J E, Halkjær M. 2009. Fast, laterally smooth inversion of airborne time-domain electromagnetic data. *Near Surface Geophysics*, 7(5-6): 599-612.
- Deng F H, Yang Y, Li D Q. 2013. The application of wide-field electromagnetic method to hidden gold deposit. *Chinese Journal of Engineering Geophysics* (in Chinese), 10(3): 357-362.
- Di Q Y, Xue G Q, Lei D, et al. 2020a. Demonstration of the newly developed MTEM systems for gold detection in China. *Geological Journal*, 55(3): 1763-1770.
- Di Q Y, Xue G Q, Yin C C, et al. 2020b. New methods of controlled-source electromagnetic detection in China. *Science China Earth Sciences*, 63(9): 1268-1277.
- Goldstein M A, Strangway D W. 1975. Audio-frequency magnetotellurics with a grounded electric dipole source. *Geophysics*, 40(4): 669-683.
- Gulbrandsen M L, Ball L B, Minsley B J, et al. 2017. Automatic mapping of the base of aquifer—A case study from Morrill, Nebraska. *Interpretation*, 5(2): T231-T241.
- Guo Z W, Xue G Q, Liu J X, et al. 2020. Electromagnetic methods for mineral exploration in China: a review. *Ore Geology Reviews*, 118: 103357, doi: 10.1016/j.oregeorev.2020.103357.
- Hawkins R, Brodie R C, Sambridge M. 2018. Trans-dimensional Bayesian inversion of airborne electromagnetic data for 2D conductivity profiles. *Exploration Geophysics*, 49(2): 134-147.
- He J S. 2010. Wide field electromagnetic sounding methods. *Journal of Central South University (Science and Technology)* (in Chinese), 41(3): 1065-1072.
- He J S, Xue G Q. 2018. Review of the key techniques on short-offset electromagnetic detection. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 61(1): 1-8, doi: 10.6038/cjg2018L0003.
- He X, Koch J, Sonnenborg T O, et al. 2014. Transition probability-based stochastic geological modeling using airborne geophysical data and borehole data. *Water Resources Research*, 50(4): 3147-3169.
- He Z X, Chen Z C, Ren W J, et al. 2020. Time-frequency electromagnetic (TFEM) method: data acquisition system and its application. *Oil & Gas Geophysics* (in Chinese), 55(5): 1131-1138.
- Hou D Y, Xue G Q, Zhou N N, et al. 2019. Exploration of deep magnetite deposit under thick and conductive overburden with ex component of SOTEM: a case study in China. *Pure and Applied Geophysics*, 176(2): 857-871.
- Huang W, Ben F, Wu S, et al. 2019. The application of orthogonal polynomial fitting method to airborne electromagnetic motion noise removal. *Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 43(4): 892-898.
- Kaufman A A, Keller G V. 1981. The magnetotelluric sounding method. *Methods in Geochemistry and Geophysics*, 15: 596.
- Killingbeck S F, Booth A D, Livermore P W, et al. 2020. Characterisation of subglacial water using a constrained transdimensional Bayesian transient electromagnetic inversion. *Solid Earth*, 11(1): 75-94.
- Koch J, He X, Jensen K H, et al. 2014. Challenges in conditioning a stochastic geological model of a heterogeneous glacial aquifer to a comprehensive soft data set. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(8): 2907-2923.
- Li H, Xue G Q, Zhao P, et al. 2016. The Hilbert-Huang transform-based denoising method for the tem response of a PRBS source signal. *Pure and Applied Geophysics*, 173(8): 2777-2789.
- Li H, Xue G Q, He Y M. 2019. Decoupling induced polarization effect from time domain electromagnetic data in a Bayesian framework. *Geophysics*, 84(6): A59-A63.
- Li S Y, Lin J, Yang G H, et al. 2013. Ground-Airborne electromagnetic signals de-noising using a combined wavelet transform algorithm. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56(9): 3145-3152, doi: 10.6038/cjg20130927.
- Li X, Xue G Q, Guo W B. 2007. Research progress in TEM pseudo-seismic imaging. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 22(3): 811-816, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2007.03.023.
- Li X, Zhang Y Y, Lu X S, et al. 2015. Inverse synthetic aperture imaging of ground-airborne transient electromagnetic method with a galvanic source. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 58(1): 277-288, doi: 10.6038/cjg20150125.
- Liang W T, Sun X S, Wang D B, et al. 2020. The application of the wide field electromagnetic method in the exploration of the Hewa polymetallic ore deposit. *Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 44(5): 1048-1052.
- Lin J, Chen J, Liu F, et al. 2021. The helicopter time-domain electromagnetic technology advances in China. *Surveys in Geophysics*, 42(3): 585-624.
- Liu C S, Liu T, Ren T Y, et al. 2019. Optimization and design of air-core coil sensor for ground-airborne frequency-domain electromagnetic detection. *Chinese Journal of Scientific Instrument* (in Chinese), 40(2): 140-147.
- Liu T. 2019. Research on air-core coil magnetic sensor technology for ground-airborne frequency-domain electromagnetic method [Master's thesis](in Chinese). Changchun: Jilin University.
- Marker P A, Vilhelmsen T N, Foged N, et al. 2017. Probabilistic predictions using a groundwater model informed with airborne EM data. *Advances in Water Resources*, 103: 86-98.

- Minsley B J, Foks N L, Bedrosian P A. 2021. Quantifying model structural uncertainty using airborne electromagnetic data. *Geophysical Journal International*, 224(1): 590-607.
- Pei Y F, Rong L L, Zhang Y, et al. 2019. Removal of geomagnetic field in low-temperature SQUID TEM. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 34(2): 622-627, doi: 10.6038/pg2019CC0067.
- Smith R S, Wood G R, Powell B. 2010. Detection of alteration at the Millennium uranium deposit in the Athabasca Basin: a comparison of data from two airborne electromagnetic systems with ground resistivity data. *Geophysical Prospecting*, 58(6): 1147-1158.
- Song G Z, Yan C M, Cao J, et al. 2017. Breakthrough and significance of exploration at depth more than 1000 m in Jiaojia Metallogenic belt, Jiaodong: a case of Shaling mining area. *Gold Science and Technology* (in Chinese), 25(3): 19-27.
- Song M C, Cui S X, Zhou M L, et al. 2010. The deep oversize gold deposit in the Jiaojia field, Shandong Province and its enlightenment for the Jiaojia-type gold deposits. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 84(9): 1349-1358.
- Song M C, Wan G P, Cao C G, et al. 2012a. Geophysical-geological interpretation and deep-seated gold deposit prospecting in Sanshandong-Jiaojia area, Eastern Shandong Province, China. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 86(3): 640-652.
- Song M C, Yi P H, Xu J X, et al. 2012b. A step metallogenetic model for gold deposits in the northwestern Shandong Peninsula, China. *Science China Earth Sciences*, 55(6): 940-948.
- Song M C. 2015. The main achievements and key theory and methods of deep-seated prospecting in the Jiaodong gold concentration area, Shandong Province. *Geological Bulletin of China* (in Chinese), 34(9): 1758-1771.
- Song M C, Song Y X, Ding Z J, et al. 2019. The discovery of the Jiaojia and the Sanshandao giant gold deposits in Jiaodong peninsula and discussion on the relevant issues. *Geotectonica et Metallogenia* (in Chinese), 43(1): 92-110.
- Song M C, Lin S Y, Yang L Q, et al. 2020. Metallogenic model of Jiaodong Peninsula gold deposits. *Mineral Deposits* (in Chinese), 39(2): 215-236.
- Song M C, Ding Z J, Zhang J J, et al. 2021. Geology and mineralization of the Sanshandao supergiant gold deposit (1200 t) in the Jiaodong Peninsula, China: A review. *China Geol*, 4: 686-719.
- Strack K M. 1992. *Exploration with Deep Transient Electromagnetics*. Amsterdam: Elsevier.
- Teng J W. 2003. Dynamic process of substance and energy exchanges in depths of the Earth and formation of mineral resources. *Geotectonica et Metallogenia* (in Chinese), 27(1): 3-21.
- Teng J W. 2006. Strengthening geophysical exploration and exploitation of metallic minerals in the second deep space of the crustal interior. *Geological Bulletin of China* (in Chinese), 25(7): 767-771.
- Teng J W, Yang L Q, Yao J Q, et al. 2007. Deep discover ore, exploration and exploitation for metal mineral resources and its deep dynamical process of formation. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 22(2): 317-334.
- Teng J W, Tian Y, Liu C, et al. 2008. Dual-phase sedimentary basins and old crystalline basement in China and deep oil and gas reservoirs in Northeast China. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* (in Chinese), 38(4): 527-552.
- Teng J W, Yao J J, Jiang C Z, et al. 2009. Magmatic rock mass and information for large and superlarge mineral deposits and its ore-prospecting effect in deep crust. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 25(5): 1009-1038.
- Teng J W, Song P H, Zhang X M, et al. 2016. The driving force and movement of materials in the Earth's interior. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 61(18): 1995-2019.
- Teng J W. 2021. High-precision geophysics: the inevitable development track of the innovative future. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 64(4): 1131-1144.
- Vallée M A, Smith R S. 2009. Inversion of airborne time-domain electromagnetic data to a 1D structure using lateral constraints. *Near Surface Geophysics*, 7(1): 63-71.
- Wang Y, Xi Z Z, Jiang H, et al. 2017. The application research on the detection of karst disease of airport runway based on OCTEM. *Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 41(2): 360-363.
- Wu X, Xue G Q, Fang G Y, et al. 2019. The development and applications of the semi-airborne electromagnetic system in China. *IEEE Access*, 7: 104956-104966.
- Wu X, Xue G Q, He Y M, et al. 2020. Removal of multisource noise in airborne electromagnetic data based on deep learning. *Geophysics*, 85(6): B207-B222.
- Xue G Q, Li X, Di Q Y. 2007. The progress of TEM in theory and application. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 22(4): 1195-1200.
- Xue G Q, Chen W Y, Zhou N N, et al. 2013. Short-offset TEM technique with a grounded wire source for deep sounding. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56(1): 255-261, doi: 10.6038/cjg20130126.
- Xue G Q, Gelius L J, Sakyi P A, et al. 2014. Discovery of a hidden BIF deposit in Anhui province, China by integrated geological and geophysical investigations. *Ore Geology Reviews*, 63: 470-477.
- Xue G Q, Chen W Y, Yan S. 2018. Research study on the short offset time-domain electromagnetic method for deep exploration. *Journal of Applied Geophysics*, 155: 131-137.
- Xue G Q, Li H, He Y M, et al. 2020. Development of the inversion method for transient electromagnetic data. *IEEE Access*, 8: 146172-146181.
- Yan J Y, Teng J W, Lü Q T. 2008. Geophysical exploration and application of deep metallic ore resources. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 23(3): 871-891.
- Yan L J, Hu W B, Chen Q L, et al. 2001. Trial with LOTEM to investigate detailed geological structure in the area covered with carbonatite. *Seismology and Geology* (in Chinese), 23(2): 271-286.
- Yin C C, Huang X, Liu Y H, et al. 2014. Footprint for frequency-domain airborne electromagnetic systems. *Geophysics*, 79(6): 1-11.

E243-E254.

Yin C C, Ren X Y, Liu Y H, et al. 2015. Review on airborne electromagnetic inverse theory and applications. *Geophysics*, 80(4): W17-W31.

Yin C C, Zhang B, Liu Y H, et al. 2015. Review on airborne EM technology and developments. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 58(8): 2637-2653, doi: 10.6038/cjg20150804.

Zhang C H, Liu X J, He L F, et al. 2013. A study of exploration organic rich shales using Time-Frequency Electromagnetic Method (TFEM). *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56(9): 3173-3183, doi: 10.6038/cjg20130930.

Zhang J, Wang C Y, Shi Y L, et al. 2004. Three-dimensional crustal structure in central Taiwan from gravity inversion with a parallel genetic algorithm. *Geophysics*, 69(4): 917-924.

Zhang W W, Di Q Y, Geng Q L, et al. 2020. The removal of MTEM periodic noise based on digital recursive notching. *Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 44(2): 278-289.

Zhou N N, Xue G Q, Hou D Y, et al. 2016. Short-offset grounded-wire TEM method for efficient detection of mined-out areas in vegetation-covered mountainous coalfields. *Exploration Geophysics*, 48(4): 374-382.

Zhu T. 2018. Study on transient electromagnetic method of denoising based on Hilbert-Huang transform [Master's thesis](in Chinese). Xi'an: Chang'an University.

Ziolkowski A, Hobbs B A, Wright D. 2007. Multitransient electromagnetic demonstration survey in France. *Geophysics*, 72(4): F197-F209.

附中文参考文献

邓锋华, 杨洋, 李帝铨. 2013. 广域电磁法在隐伏金矿中的应用. *工程地球物理学报*, 10(3): 357-362.

何继善. 2010. 广域电磁深法研究. *中南大学学报(自然科学版)*, 41(3): 1065-1072.

何继善, 薛国强. 2018. 短偏移距电磁探测技术概述. *地球物理学报*, 61(1): 1-8, doi: 10.6038/cjg2018L0003.

何展翔, 陈忠昌, 任文静等. 2020. 时频电磁(TFEM)勘探技术: 数据采集系统. *石油地球物理勘探*, 55(5): 1131-1138.

黄威, 贲放, 吴珊等. 2019. 正交多项式法在航空电磁运动噪声去除中的应用. *物探与化探*, 43(4): 892-898.

李肃义, 林君, 阳贵红等. 2013. 电性源时域地空电磁数据小波去噪方法研究. *地球物理学报*, 56(9): 3145-3152, doi: 10.6038/cjg20130927.

李貅, 薛国强, 郭文波. 2007. 瞬变电磁法拟地震成像研究进展. *地球物理学进展*, 22(3): 811-816, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2007.03.023.

李貅, 张莹莹, 卢绪山等. 2015. 电性源瞬变电磁地空逆合成孔径成像. *地球物理学报*, 58(1): 277-288, doi: 10.6038/cjg20150125.

梁维天, 孙新胜, 王东波等. 2020. 广域电磁法在河洼多金属矿勘

查中的应用. *物探与化探*, 44(5): 1048-1052.

刘长胜, 刘腾, 任同等. 2019. 地空频率域电磁系统空心线圈传感器优化设计. *仪器仪表学报*, 40(2): 140-147.

刘腾. 2019. 地空频率域电磁探测空心线圈磁传感技术研究[硕士论文]. 长春: 吉林大学.

裴易峰, 荣亮亮, 张懿等. 2019. 低温 SQUID 瞬变电磁法中去除地磁场影响的方法研究. *地球物理学进展*, 34(2): 622-627, doi: 10.6038/pg2019CC0067.

宋国政, 闫春明, 曹佳等. 2017. 胶东焦家成矿带超千米深部金矿勘查突破及意义—以纱岭矿区为例. *黄金科学技术*, 25(3): 19-27.

宋明春, 崔书学, 周明岭等. 2010. 山东省焦家矿区深部超大型金矿床及其对“焦家式”金矿的启示. *地质学报*, 84(9): 1349-1358.

宋明春. 2015. 胶东金矿深部找矿主要成果和关键理论技术进展. *地质通报*, 34(9): 1758-1771.

宋明春, 宋英昕, 丁正江等. 2019. 胶东焦家和三山岛巨型金矿床的发现及有关问题讨论. *大地构造与成矿学*, 43(1): 92-110.

宋明春, 林少一, 杨立强等. 2020. 胶东金矿成矿模式. *矿床地质*, 39(2): 215-236.

滕吉文. 2003. 地球深部物质和能量交换的动力过程与矿产资源的形成. *大地构造与成矿学*, 27(1): 3-21.

滕吉文. 2006. 强化开展地壳内部第二深度空间金属矿产资源地球物理找矿、勘探和开发. *地质通报*, 25(7): 767-771.

滕吉文, 杨立强, 姚敬全等. 2007. 金属矿产资源的深部找矿、勘探与成矿的深层动力过程. *地球物理学进展*, 22(2): 317-334.

滕吉文, 姚敬金, 江昌洲等. 2009. 地壳深部岩浆岩岩基体与大型、超大型金属矿床的形成及找矿效应. *岩石学报*, 25(5): 1009-1038.

滕吉文, 宋鹏汉, 张雪梅等. 2016. 地球内部物质的运动与动力. *科学通报*, 61(18): 1995-2019.

滕吉文. 2021. 高精度地球物理学是创新未来的必然发展轨迹. *地球物理学报*, 64(4): 1131-1144.

王银, 席振铎, 蒋欢等. 2017. 等值反磁通瞬变电磁法在探测岩溶病害中的应用. *物探与化探*, 41(2): 360-363.

薛国强, 李貅, 底青云. 2007. 瞬变电磁法理论与应用研究进展. *地球物理学进展*, 22(4): 1195-1200.

薛国强, 陈卫营, 周楠楠等. 2013. 接地源瞬变电磁短偏移深部探测技术. *地球物理学报*, 56(1): 255-261, doi: 10.6038/cjg20130126.

严加永, 滕吉文, 吕庆田. 2008. 深部金属矿产资源地球物理勘查与应用. *地球物理学进展*, 23(3): 871-891.

严良俊, 胡文宝, 陈清礼等. 2001. 长偏移距瞬变电磁深法在碳酸盐岩覆盖区落实局部构造的应用效果. *地震地质*, 23(2): 271-286.

殷长春, 张博, 刘云鹤等. 2015. 航空电磁勘查技术发展现状及展望. *地球物理学报*, 58(8): 2637-2653, doi: 10.6038/cjg20150804.

张文伟, 底青云, 耿启立等. 2020. 基于数字递归陷波的多通道瞬变电磁法周期噪声去除研究. *物探与化探*, 44(2): 278-289.

朱通. 2018. 基于 Hilbert-Huang 变换的瞬变电磁噪声压制研究与应用[硕士论文]. 西安: 长安大学.

(本文编辑 汪海英)